

混合生物质颗粒燃料的燃烧特性

矫振伟¹, 赵武子², 王瀚平¹, 苏俊林¹

(1. 吉林大学热能工程系, 吉林长春130025; 2. 中国人民解放军93279部队, 辽宁丹东118000)

摘要: 从生物质燃料的灰熔融性和热值两个关键性的特性指标着手, 以玉米秸秆和水稻稻壳作为主要原料, 用试验优化设计和分析的方法, 寻求混合生物质颗粒燃料的优化配方, 提高混合生物质颗粒的软化温度 $ST > 1400$, 有效地解决了玉米秸秆颗粒结渣问题。对混合生物质颗粒进行了热重试验研究和燃烧机理、动力学特性分析, 结果表明: 混合生物质颗粒具有易着火和单峰值热解特性, 燃烧性能良好。此研究为改善单一成分生物质燃料的燃烧性能, 推广利用生物质能提供指导性建议。

0引言

当前, 许多国家将开发利用可再生能源作为能源战略的重要组成部分, 而生物质作为一种可存储的可再生能源, 引起了世界各国的广泛关注。

生物质能资源丰富, 约占世界能源总消耗的14%^{[1]~[3]}

。将生物质进行压缩固化, 使其转化为高品位燃料是生物质能利用的重要方法。自20世纪30年代开始, 许多发达国家(如美国、日本、芬兰、丹麦)都投入了大量人力、物力研究生物质成型技术及颗粒燃料, 80年代后期, 该技术日趋成熟, 形成了一定规模^{[4], [5]}

。我国由于起步较晚, 对生物质颗粒燃料

燃烧所进行的理论和应用研究较少^[6]

, 技术进步较慢。对生物质固体颗粒燃烧过程中物理化学反应机理尚不明确, 灰渣的化学成分还不确定, 结渣的原因有待于进一步的分析。刘圣勇认为, 不同相对孔隙率的玉米秸秆成型燃料本身的空隙中含有的空气对燃烧产生一定的影响

, 进行的试验研究结果表明: 在10~20MPa压力下, 玉米秸秆成型燃料具有较好的压缩成型性能和燃烧性能^{[7], [8]}。

马孝琴针

对秸秆燃烧过程中的沉

积物和灰的化学元素进行了分析, 认为秸秆灰

中的碱金属化合物与 SiO_2

反应生成低熔点的共晶体, 熔化的共晶体流动、粘合形成结渣; 提出了使用添加剂改变灰形成的化学过程、生物质与其他燃料(燃煤)混烧、碱金属脱除、适宜的锅炉设计等研究方法^[9]。

笔者曾做过生物质型煤方面的研究, 生物质型煤燃

烧性能较好^[10]

。我们在实际应用中发现, 掺有稻壳粉的玉米秸秆颗粒燃烧过程中结焦倾向小。而秸秆颗粒制造商是为了吸收秸秆挤压成型过程中挤压出的水分在物料中掺杂些磨米产生的副产品稻壳粉。对这种混合生物质颗粒在燃烧过程中抗结焦性和燃烧特性并没有进行深入了解。针对这一现象我们进行了试验研究。

1混合生物质颗粒燃料的设计与试验研究

目前, 生物质固体燃料有秸秆颗粒、稻壳棒、木质颗粒等, 大多为单一成分。玉米秸秆颗粒的总量比例较大, 玉米秸秆颗粒在燃烧过程中有易结焦的问题。为解决这个难题, 我们利用不易结焦的稻壳粉、木屑掺混在秸秆粉中, 进行不同组分配比在不同成型条件下的混合颗粒性能试验研究。

选取玉米秸秆、稻壳粉、木屑为研究对象的原因, 是因为玉米秸秆产量占生物质废弃物总量的比重较大, 且结焦问题阻碍其应用; 大米是我国居民饮食中的主粮, 其副产品稻壳粉在磨米厂堆积如山, 成为磨米厂不易处理的东西。木屑具有很好的燃烧性能。采用长沙三德实业有限公司生产的SDACM-3000自动量热仪、SDTGA-2000自动工业分析仪和SDAF2000d灰熔融性自动测试仪, 进行玉米秸秆、稻壳粉、木屑的热值、工业分析、灰熔融性测定(试验气氛均为氧化性), 其数据如表1。

表 1 生物质原料参数表

Table 1 Biomass raw material parameters table

生物质颗粒 试样	变形温度 $DT/^{\circ}\text{C}$	软化温度 $ST/^{\circ}\text{C}$	半球温度 $HT/^{\circ}\text{C}$	流动温度 $FT/^{\circ}\text{C}$	收到基水分 $M_{ad}/\%$	收到基挥发分 $V_{ad}/\%$	收到基灰分 $A_{ad}/\%$	收到基固定碳 $F_{ad}/\%$	收到基低位热值 $Q_{d,ad}/\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$
玉米秸秆	1 101	1 102	1 102	1 110	6.62	88.90	2.98	1.49	16 282.05
水稻稻壳	>1 520	>1 520	>1 520	>1 520	5.56	70.96	19.54	3.95	13 732.07
木屑	1 179	1 191	1 192	1 193	8.51	88.94	1.40	1.16	17 103.59
混合生物质	1 136	1 401	1 439	1 486	5.11	86.27	6.11	2.52	15 053.87

注：混合生物质组合成分质量百分比为 75%玉米秸秆:25%水稻稻壳（以下统称混合生物质）。

本试验取玉米秸秆与稻壳粉组合、成型温度，成型压力3个因素；每个因素取3水平，取值见表2。分析认为，玉米秸秆和木屑的热值都比较高，软化温度较低，且数值比较接近，木屑的灰分少，配比中木屑用量多，成本增加较大；水稻稻壳热值相对较低，软化温度很高，不易结渣，水稻稻壳和玉米秸秆在热值和灰熔融性方面具有互补性。

表 2 因素、水平、取值一览表

Table 2 A list of factors, levels and values

水	因素 1(F1)	因素 2(F2)	因素 3(F3)
平	混合生物质配比/%	成型压力/MPa	成型温度/ $^{\circ}\text{C}$
1	80 秸秆:20 稻壳	16	160
2	75 秸秆:25 稻壳	32	180
3	70 秸秆:30 稻壳	48	200

选用正交表L9（34）设计正交试验方案，测试每个试验的密度及外观品质、灰熔融性、结渣特性，取其加权值为目标函数。遵循NY/T1880-2010《生物质固体成型燃料样品制备方法》制取试样，遵循NY/T1881.7-2010《生物质固体成型燃料试验方法》第7部分：密度，检验试样的密度；遵照国标GB/T219-1996《煤灰熔融性的测定方法》测定试样的灰熔融性；燃料在锅炉中燃烧的状态是比较复杂的，锅炉内温度场分布不同，氧分布也不均匀，大多数是氧化性气氛中燃烧，也有局部地方通风不良呈弱还原性气氛燃烧，我们在SDAF2000d灰熔融性自动测试仪中，利用该仪器的图像采集系统和控温系统，模拟锅炉实际燃烧的氧化气氛和弱还原气氛，试样加热到1200 取出，检验其结焦性。试验结果表明：生物质颗粒燃烧结渣性与其灰熔融性有很大的关联，软化温度高，结渣倾向就小。经过目标函数的测算，F（2，2，2）组合为最优，即75%玉米秸秆 25%水稻稻壳的组分、成型压力为32MPa、成型温度为180 状态下，成型颗粒最好。其软化温度 > 1400 ，焦渣特性与普通烟煤相近。热值15053.87kJ/kg，高于当前市场销售的型煤热值。

2混合颗粒的燃烧特性试验研究

燃烧特性是衡量燃料的重要指标。很多人在研究生物质固体燃料的燃烧特性时，基于使用的热重分析仪器的要求，将固体燃料再粉碎成粉末，取其10mg左右质量做热重试验。我们认为固体颗粒燃料粉碎后，与整体颗粒时挥发分析出的过程不同，燃烧过程中与氧分子接触、反应的过程不同^[8]。因此，得到的热重曲线也就不同，燃烧特性也就不同。

我们做的混合生物质颗粒的燃烧特性试验[11]是在自行研制的热重实验台上进行的，试验用颗粒与当前市场销售的玉米秸秆颗粒的形状、大小、重量相近，见图1。试验时不需将颗粒燃料粉碎，试样质量较大，试样保持实际使用时的性状。这样在试样热解和燃烧过程中存在成型因素的影响。

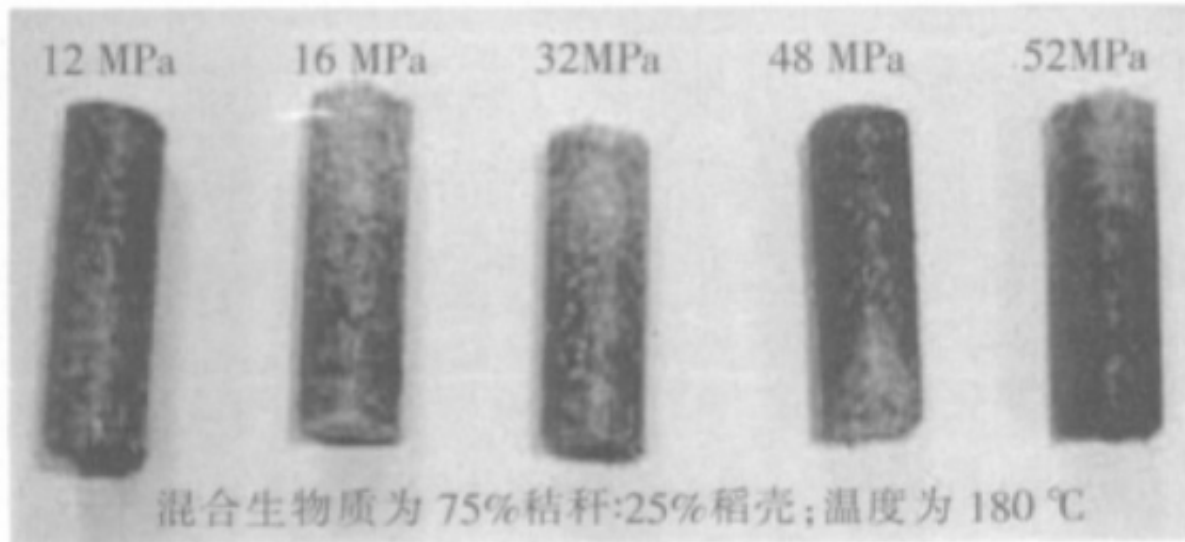


图 1 混合生物质热压成型颗粒

Fig.1 Hot-forming composite biomass pellets

热重试验是在氧化性气氛下进行的，升温速率 $\beta = 10$ /min。试验中试样由于受热，伴有水分析出、挥发分分解析出，且随着燃烧反应的进行，质量逐渐减小。试样质量和试样区域的温度同步输入计算机记录和显示，每隔1s测定一次，并绘制TG和DTG曲线。试验结果如图2、图3和表3所示。

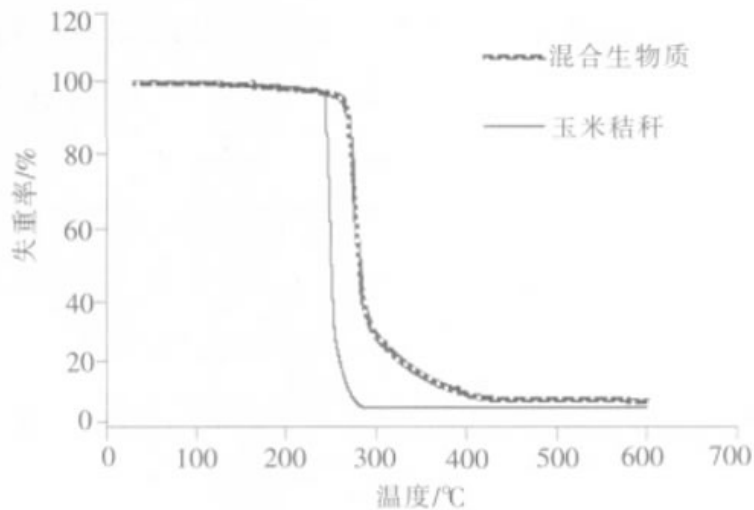


图 2 混合生物质颗粒和玉米秸秆颗粒的 TG 曲线图

Fig.2 The TG curve of composite biomass pellets and cornstalk pellets

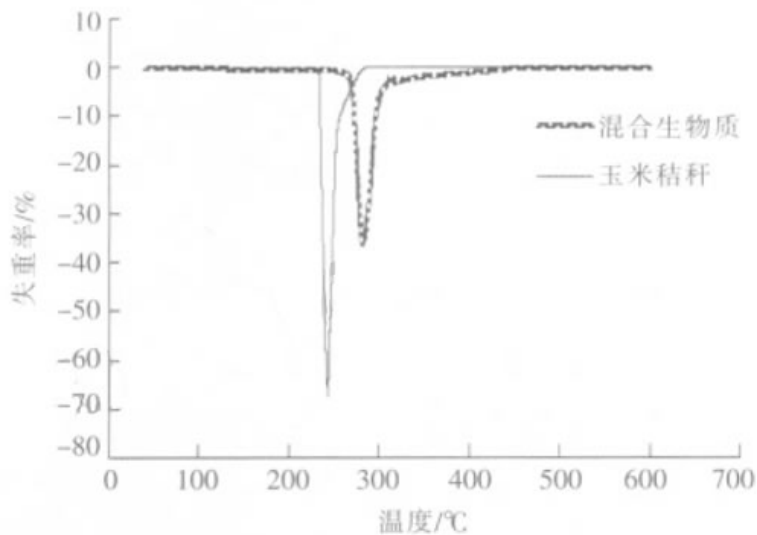


图 3 混合生物质颗粒和玉米秸秆颗粒的 DTG 曲线图

Fig.3 The DTG curve of composite biomass pellets and cornstalk pellets

表 3 生物质颗粒燃烧特征参数

Table 3 Combustion characteristic parameters of biomass pellets

特性参数	T_s ℃	T_{max} ℃	T_v ℃	T_f ℃	T_b ℃	V_{∞} %	$(dm/dt)_{max}$ %/min
玉米秸秆	233	243	253	289	56	94.27	67.24
混合生物质	260	272	284	426	166	91.79	36.54

表中参数说明：TS为挥发分初始析出温度， $^{\circ}\text{C}$ ；Tmax为最大失重温度， $^{\circ}\text{C}$ ；TV为挥发分热解、燃烧结束温度， $^{\circ}\text{C}$ ；Tf为燃烧基本结束温度， $^{\circ}\text{C}$ ；Tb燃烧全过程温度范围， $^{\circ}\text{C}$ ； V_{∞} 为燃尽率，%； $(dm/dt)_{\max}$ 为挥发分最大失重速率，%/min。

为了便于分析，在图表中

引用了在同一热重实验台上做的玉米秸秆颗粒的热重试验数据^[12]

，成型条件一致。由于颗粒燃料在成型时表观水分已经挥发掉，其内部水分随温度的升高缓慢析出，因此TG曲线和DTG曲线没出现水分挥发的峰值。

由表1可知，生物质颗粒中碳含量很少，仅为1.49%~2.52%，挥发分大量析出、燃烧，使炭粒充分接触空气中的氧和获得热量，焦炭的燃烧是连续进行的，故TG曲线和DTG曲线没出现碳燃烧的峰值；生物质颗粒燃料的TG曲线和DTG曲线是单峰值的。

表3和图2、图3的试验数据显示，混合生物质颗粒的挥发分热解、燃烧失重峰比玉米秸秆颗粒的挥发分热解、燃烧失重峰向右偏移，温度提高29 $^{\circ}\text{C}$ 左右，峰值高度减小近50%，燃烧维持的温度范围增大约300%。这一结果说明，玉米秸秆颗粒挥发分析出温度较低，并且挥发分析出时即刻燃烧，前期挥发分燃烧速度很快，挥发分燃烧温度集中在233~289 $^{\circ}\text{C}$ 内；混合生物质颗粒的挥发分析出温度较玉米秸秆颗粒的挥发分析出温度高27 $^{\circ}\text{C}$ ，前期挥发分燃烧速度也比较快，达到最大值后减缓下来，燃烧持续温度范围较宽，在260~426 $^{\circ}\text{C}$ 内。

3混合生物质颗粒的燃烧机理、动力学特性分析

燃烧反应动力学是化学反应中的一个分支，也遵循着化学反应的经典公式——阿累尼乌斯公式^{[13]~[15]}：

$$\frac{da}{dt} = Ae^{-E/RT} f(a) \quad (1)$$

式中： a 为燃烧反应失重速率，%/s； A 为频率因子，1/s； E 为反应活化能，kJ/mol； T 为反应温度，K； R 为气体常数，8.314 kJ/(mol·K)； $f(a)$ 为反应函数，通常燃烧反应取 $f(a)=(1-a)$ 。

$$\text{将升温速率: } \beta = \frac{dT}{dt} \quad (2)$$

代入(1)式中，整理得：

$$\int_0^a \frac{1}{1-a} da = \frac{A}{\beta} \int_{T_0}^T e^{-E/RT} dT \quad (3)$$

积分(3)式，整理得：

$$\ln \left[-\frac{\ln(1-a)}{T^2} \right] = \ln \left[\frac{AR}{\beta E} \left(1 - \frac{2RT}{E} \right) \right] - \frac{E}{RT} \quad (4)$$

因： $\frac{2RT}{E} \leq 1$ ，取 $\frac{2RT}{E} = 0$ ，令：

$$y = \ln \left[-\frac{\ln(1-a)}{T^2} \right], x = \frac{1}{T}$$

$$a = \ln \left[\frac{AR}{\beta E} \right], b = -\frac{E}{R}$$

则将式(4)转化为

$$y = a + bx \quad (5)$$

代入 TG 试验数据，画出 $y = a + bx$ 的曲线，如图 4 所示，得到曲线斜率 b 和截距 a 。

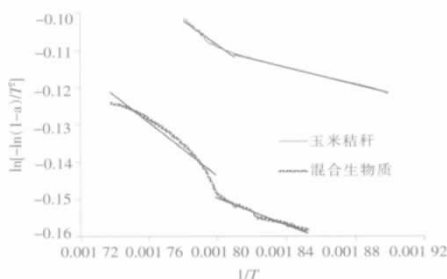


图 4 升温速率 $\beta=10$ °C/min 时， y 与 x 的关系图

Fig.4 The relationship between x and y when temperature rate $\beta=10$ °C/min

图 4 的纵、横坐标是计算过程的中间变量，利用图 4 中曲线得到关系式 $y = a + bx$ ，以得到 a, b 的值，从而通过式 $a = \ln \left[\frac{AR}{\beta E} \right], b = -\frac{E}{R}$ 得到频率因子 A 以及活化能 E 。

$$\text{通过公式: } E = -bR \quad (6)$$

计算化学反应的活化能 E 。计算结果及相关方程式如表 4 所示。

表 4 生物质颗粒燃料燃烧动力学参数

Table 4 Combustion kinetics parameters of biomass pellets

试验编号	温度 °C	相关方程	活化能 E J/mol	相关系数
混合生物质	265~284	$y = -15.597x + 13.03$	129 673.45	0.969
	284~426	$y = -35.960x + 50.33$	299 906.40	0.946
玉米秸秆	240~254	$y = -11.567x + 6.831$	96 168.04	0.998
	254~289	$y = -33.424x + 49.28$	277 887.10	0.958

从动力学参数的计算结果可见,在低温区域,混合生物质颗粒热解、燃烧的活化能比玉米秸秆颗粒热解、燃烧的活化能高,这与混合生物质颗粒的挥发分析出和着火温度均高于玉米秸秆颗粒是一致的。在碳燃烧区域,混合生物质颗粒的活化能也比玉米秸秆颗粒的活化能有增加。分析认为:混合生物质颗粒由于加入25%的水稻稻壳,使混合生物质颗粒中的固定碳和灰分的含量增加,达到8.63%,是纯玉米秸秆颗粒固定碳和灰分含量(4.47%)的两倍。

4结论

(1) 试验证明,在玉米秸秆中掺混25%的稻壳粉,使混合生物质颗粒燃烧过程灰行为发生改变,提高了灰的软化温度,达到1400,大大减小结渣倾向,说明改善生物质颗粒燃料的抗结焦性能,不限于仅采用添加剂的方法,本研究提出了以生物质废弃物的混合搭配方法,解决了玉米秸秆颗粒结渣问题。

(2) 混合生物质颗粒的TG曲线和DTG曲线、动力学分析计算结果表明:混合生物质颗粒的挥发分析出温度是比较低的,虽然比玉米秸秆颗粒的挥发分析出温度高27,也只有260,且当达到析出温度后,前期挥发分的热解和燃烧速度也比较快,很有利于燃料的着火;混合生物质颗粒的DTG曲线峰值没有玉米秸秆颗粒的DTG曲线峰值高,减小近50%,且燃烧维持的温度范围增大,挥发分析出、扩散速度减缓,有利于二次风的供应与可燃物质充分混合、反应。同时炉内温度提高,增强了热辐射能力,有利于焦炭充分燃烧。

参考文献:

[1]SAXENARC, ADHIKARIDK, GOYALHB.Biomass based energy fuel through biochemical routes: A review[J].Renewable and Sustainable Energy Review, 2009, 13(1): 167-178.

[2]AYHAN DEMIRBAS.Combustion characteristics of different biomass fuels[J].Progress in Energy and Combustion Science, 2004, 30(2): 219-230.

[3]YAN JJ, XU F, KANG CJ, HIGANO Y.Comprehensive evaluation of integrated pollutant-minimization policies in rural areas around Beijing: case study of Miyun County[J].Japan Association for Human and Environmental Symbiosis, 2010, 6(17): 87-98.

[4]LIN W, SONG W.Power production from biomass in Denmark[J].Journal Chemistry and Technology, 2005, 33(6): 650-655.

[5]GROVER P D, MISHRA S K.Proceedings of the inter-national workshop on biomass briquetting[DB/OL].<http://wgbis.ces.iisc.ernet.in/energy/HC270799/RWEDP/acrobat/fd46.pdf>.2008-03-13.

[6]赵廷林,舒伟,邓大军,等.生物质致密成型技术研究现状与发展[J].特别关注,2007,12(4): 29-33.

[7]袁艳文,林聪,赵立欣,等.生物质固体成型燃料抗结渣研究进展[J].可再生能源,2009,27(5): 48-51.

[8]刘圣勇,王晓东,王智展,等.玉米秸秆成型燃料孔隙率对燃烧效果的影响[J].河南农业大学学报,2008,42(6): 686-688.

[9]马孝琴.秸秆燃烧过程中碱金属问题研究的新进展[J].水利电力机械,2006,28(12): 28-34.

[10]陈华艳,苏俊林,矫振伟.生物质型煤燃烧特性[J].吉林大学学报,2008,38(6): 1281-1286.

[11]矫振伟,苏俊林,王国华,等.燃料热重实验台的研制[J].实验技术与管理,2007,24(6): 49-51.

[12]苏俊林,戴文仪,矫振伟.玉米秸秆颗粒燃料的热工特性[J].吉林大学学报(工学版),2010,40(2): 386-390.

[13]梁爱云,惠世恩,徐通模,等.几种生物质的TG-DTG分析及其燃烧动力学特性研究[J].可再生能源2008,26(4): 56-61.

[14]闵凡飞,张明旭.生物质燃烧模式及燃烧特性的研究[J].煤炭学报200,30(1): 100-108.

[15]王翠苹,李定凯,王凤印,等.生物质成型颗粒燃料燃烧特性的试验研究[J].农业工程学报,2006,22(10):174-177.

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/114341.html>